

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240390

面向新型电力系统的负荷模型研究综述

陶劲宇¹, 秦川¹, 金宇清¹, 鞠平¹, 李建华²

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 211000; 2. 国家电网公司华东分部, 上海 200002)

摘要: 为实现“碳达峰”、“碳中和”目标, 需要构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统。新型电力系统的显著特征是含有高比例新能源、高比例电力电子设备和高比例新负荷, 因此新型电力系统的负荷特性会发生明显变化。首先, 从负荷总量和负荷成分两个方面总结了电力负荷发生的变化, 分析了负荷模型面临的研究挑战。然后, 从机理性和非机理性模型的角度分别介绍了电力电子接口负荷模型和含分布式电源的广义负荷模型, 并指明了进一步的研究需求。最后, 针对新型电力系统仿真的新需求, 介绍了三类其他方面的专用负荷模型, 包括电磁暂态负荷模型、短路电流负荷模型以及负荷谐波模型, 并对未来研究内容给出了建议。

关键词: 新型电力系统; 负荷模型; 电力电子接口负荷; 分布式电源; 电磁暂态仿真; 短路电流计算; 负荷谐波

A review of load models for new power systems

TAO Jinyu¹, QIN Chuan¹, JIN Yuqing¹, JU Ping¹, LI Jianhua²

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200002, China)

Abstract: To achieve the goals of “carbon peak” and “carbon neutrality”, a type of new power system with increasing proportion of renewable energy needs to be built. The significant characteristics of the new power system include a high proportion of renewable energy, a high proportion of power electronic equipment, and a high proportion of new load, which will result in significant changes in the load characteristics of the power system. First, the changes in power load are summarized from the perspectives of total load and load composition, and the research challenges faced by load models are analyzed. Then, the power-electronic-interfaced load models and the generalized load models with distributed generations are introduced from both the mechanistic and non-mechanistic model perspectives, pointing out the need for further research. Finally, in response to the new simulation requirements for the new power system, three types of specialized load models are presented, namely, electromagnetic transient load model, short-circuit current load model, and load harmonic model, with suggestions for future research directions.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China (No. 5100-202355009A-1-1-ZN).

Key words: new power system; load model; power-electronic-interfaced load; distributed generation; electromagnetic transient simulation; short-circuit current calculation; load harmonics

0 引言

大电网运行控制策略的制定主要依赖于仿真计算, 而仿真计算的精度则取决于所用模型。作为电力系统模型的重要组成部分, 负荷模型对电力系统的安全稳定运行具有重要影响。在实际电网中, 多

数负荷分散地接入中低压配电网, 具有时变性、分布性和随机性等特点, 给负荷建模工作带来了严峻挑战^[1]。

负荷模型研究受到了国内外电力研究人员的广泛关注, 取得了丰富的研究成果。传统的负荷模型主要有静态模型和动态模型两类。静态模型用于描述电压和频率缓慢变化时的功率特性, 包含多项式模型和幂函数模型。动态模型用于描述电压和频率快速变化时的功率特性, 又可分为机理性动态模型

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (5100-202355009A-1-1-ZN)

与非机理性动态模型。典型的机理性动态模型包括经典负荷模型(classic load model, CLM)和综合负荷模型(synthesis load model, SLM)^[2-4]。两者的主要区别在于对配电网阻抗的等值方式不同。此外 SLM 进一步考虑了无功补偿设备^[5]。非机理性模型又称为输入输出模型, 它关注负荷的整体外特性, 常用的形式有传递函数模型、神经网络模型等。

目前, 已有文献对以往负荷建模研究工作进行了综述和总结。文献[6]将未来建模工作概括为模型结构的“定性正确”和模型参数的“定量准确”两步走问题; 文献[7]详细介绍了现有的各类负荷模型结构和经典建模方法; 文献[8]提出了含主动负荷的综合负荷建模研究框架; 文献[9]总结了新型负荷元件模型的研究进展, 归纳了现有建模方法, 并从负荷新特性建模、在线建模方法等方面展望了未来研究工作。

为实现“碳达峰、碳中和”目标, 我国正在构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统^[10-12]。截至 2023 年底, 我国风电、光伏发电装机规模已达 10.5

亿 kW, 占总装机容量的 36%, 且分布式新能源发电的新增装机容量逐年上升。预计到 2030 年, 风电和光伏发电装机总容量将达 12 亿 kW^[13]。与此同时, 随着半导体器件和控制技术的发展, 电力电子设备在高压直流输电^[14]、灵活交流输电^[15]、新能源并网^[16]、负荷侧的应用更为广泛。新型电力系统呈现出明显的高比例新能源并网、高比例电力电子设备以及高比例新负荷的特征^[17]。随着新型电力系统建设的不断推进, 电力负荷特性也发生重大变化, 需要开展面向新型电力系统的负荷模型研究。

为此, 本文聚焦面向新型电力系统的负荷模型, 进行综述与研究展望, 总体框架如图 1 所示。本文总结了电力负荷正在发生的变化和负荷模型面临的挑战, 梳理了现有的新型负荷模型, 包括电力电子接口负荷模型和含分布式电源的负荷模型, 并分析了未来的研究需求; 针对新型电力系统负荷模型的新需求, 讨论了电磁暂态仿真、短路电流计算和谐波分析中的负荷模型, 为后续的负荷模型研究工作提供参考。

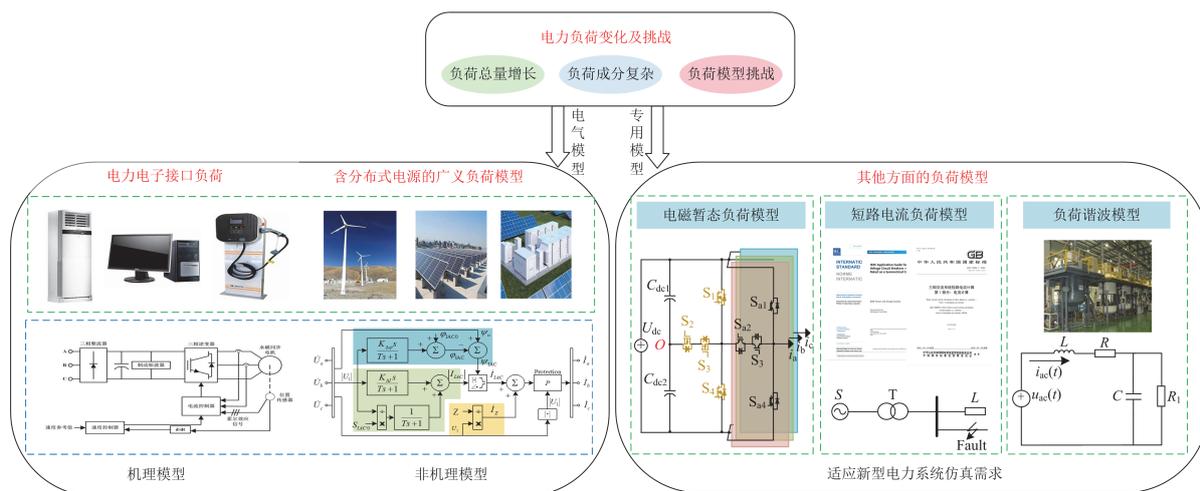


图 1 面向新型电力系统的负荷模型研究框架

Fig. 1 Framework for load model of the new power system

1 电力负荷变化与研究挑战

1.1 负荷总量变化

随着社会经济的发展与“再电气化”的推进, 我国电力需求正处于快速增长阶段。根据国家能源局发布的全社会用电量数据^[18], 如图 2 所示, 2023 年全社会用电量达 9.2 万亿 kWh, 同比增长 6.7%, 其中城乡居民用电量达 13 524 亿 kWh, 同比增长 0.9%。近十年社会用电量增加了 73%, 城乡居民用电量占比由 12% 上升至 15% 左右。预计到 2030 年, 我国电力需求将达到 11 万亿 kWh。到 2060 年, 我国

清洁能源发电量占比将超过 90%, 电能消费量将占能源终端总消费的 60%^[19]。电力负荷总量的持续上升, 使得负荷对电力系统动态特性的影响更为显著。

1.2 负荷成分变化

从用电结构看, 随着城市化以及新农村化建设的发展, 城乡居民负荷占总负荷的比例将进一步上升。同时在加快经济转型升级以及推动新质生产力发展的背景下, 高耗能的传统工业负荷占比将逐渐下降, 智能制造、数据中心等新型工业负荷占比将进一步提高^[20]。

从负荷设备种类来看, 新型电力系统的负荷成



图 2 2013—2023 年全社会用电量与城乡居民用电量趋势图

Fig. 2 Trend of electricity consumption of the whole society and urban and rural residents from 2013 to 2023

分变化主要表现为:

1) 多种新型电力负荷设备通过电力电子装置接入电网,该类负荷统称为电力电子接口负荷(下文简称 E 负荷)。变频电机、开关电源等新型设备与传统设备相比通常拥有更优良的性能和能耗表现。E 负荷具有离散和连续混杂性。离散性体现在控制电路的分段式离散控制,连续性体现在设备功率变化的连续^[21]。

2) 分布式电源(distributed generation, DG)在配电网中渗透率不断上升。分布式电源近年来发展十分迅速,目前主要有分布式风机、分布式光伏和分布式储能等形式^[22]。根据电源形式的不同, DG 的并网方式分为直接并网和通过变流器并网。在负荷模型中通常将分布式电源看作是一种发出功率的广义负荷。

3) 配电网网络呈现出复杂化趋势。DG 和可控性负荷大量接入配电网后形成主动配电网(active distribution network, ADN)^[23]。在建立综合负荷模型时,需要考虑配电网网络的影响,而 ADN 的动态特性比传统配电网更加复杂。因此对 ADN 的等效建模方法与传统配电网将有所不同。

可见,电力负荷正发生着重要变化,负荷的复杂性和随机性进一步增强。复杂性既来自负荷构成愈发复杂,也来自于新型负荷设备自身的复杂特性。随机性来自于分布式新能源出力的波动性与间歇性,也来自于电动汽车等柔性负荷的大量接入。

1.3 负荷模型的研究挑战

新型电力系统的发展建设对电力系统仿真分析带来了新的挑战。1) 从仿真规模来看,发电侧新能源场站和配电网侧分布式电源的广泛接入,使新型电力系统网络结构更为复杂,节点数量大幅提高; 2) 从仿真尺度来看,高比例电力电子技术的应用使

得多时间尺度下的暂态过程紧密耦合,从微秒级的电磁暂态过程到数十秒级的动态过程都包含在内; 3) 从仿真内容来看,传统电力系统仿真对象主要是大型同步机组、输配电设备以及由 SLM 或 CLM 表示的等值负荷模型。而新型电力系统中新能源机组分散地接入电网,单机容量小,同时新设备元件涌现、特性各异。因此仿真规模更为庞大,仿真场景更为丰富多样^[24-25]。

作为电力系统仿真的关键环节之一,负荷模型也迎来了新的研究挑战。1) 需要适应负荷的新变化。新型电力系统负荷侧呈现出结构多样化、电压敏感化、行为复杂化、高度电力电子化的新特征。E 负荷和分布式电源等新型负荷元件在内部控制作用下具有复杂的动态特性,广泛接入后与配电网动态过程交织耦合,导致配电网整体负荷特性发生深刻改变。2) 需要适应新型电力系统的变化。新型电力系统由传统的“源随荷动”转变为“源网荷储互动”,主配电网与用户侧动态耦合显著增强。当系统扰动传导至低压配电网,E 负荷与分布式电源可能在内部保护控制下脱网,进一步影响主网的安全稳定运行。近年来一些电网发生多起因电压暂降引发的负荷减供事故,体现出传统综合负荷模型在表征负荷动态响应过程方面的不足,从而无法准确评估电网的安全稳定风险。因此,亟需在深入研究新型负荷元件的动态响应、控制策略和电压耐受等特性的基础上,建立能够兼顾仿真精度和仿真效率的实用化综合负荷等值模型。

此外,面向新型电力系统的不同仿真需求,还需要研究适用于各类场景的专用负荷模型。

1) 机电暂态仿真仅考虑基频相量,无法描述电力电子器件微秒级的高频动态行为,含有高比例电力电子的新型电力系统仿真将需要更精细的电磁暂

态模型, 在更小的仿真步长上准确描述系统的暂态过程。未来新型电力系统的全电磁暂态仿真中负荷模型是必不可少的一部分, 因此电磁暂态方面的负荷模型需要得到重视。

2) 配电网保护装置的整定取决于短路电流计算。传统配电网的潮流单向固定, 拓扑结构相对简单, 故障时短路电流计算相对成熟。分布式电源改变了配电网原有供电结构, 在故障中会影响短路电流大小及方向, E 负荷也会因内部控制作用出现低压脱扣行为, 从而导致配电网保护设备误动或拒动。为此, 需要研究短路电流方面的负荷模型, 以满足新型配电网的短路计算需求以及继电保护技术要求。

3) 高比例电力电子设备的应用给配电网带来了更为严重的谐波问题^[26]。谐波源种类多样, 既有电弧炉等传统谐波源, 也有 E 负荷、分布式电源等新型谐波源; 谐波含量提升, 既有谐波总量上升, 又包含间谐波、高频谐波占比提高; 谐波产生机理复杂, 通用性谐波机理分析困难。构建准确描述负荷谐波特性的模型能为治理配电网谐波以及保障电能质量提供重要理论基础。

综上所述, 新型电力系统的负荷模型研究迎来了新的需求与挑战。负荷模型需要具备更高的准确性、更强的适应性、更好的实用性。同时也要注意模型在形式和阶次上的简洁性, 以免给电力系统仿真计算带来“维数灾”。

2 电力电子接口负荷模型

E 负荷原理如图 3 所示。根据设备内部是否包含电源, 可分为无源类以及有源类 E 负荷。也可根据负荷是否包含旋转电机, 将其分为旋转类和非旋转类设备。典型旋转类设备有变频电机、变频空调等, 特点是内部的感应电机由变频器(variable frequency drive, VFD)驱动; 非旋转类设备主要包括 LED 灯、节能灯等照明设备, 以及各种计算机电源、充电器等开关电源供电设备, 特点是由稳压电源供电工作。

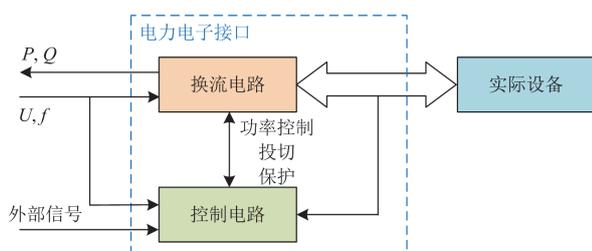


图 3 E 负荷原理图

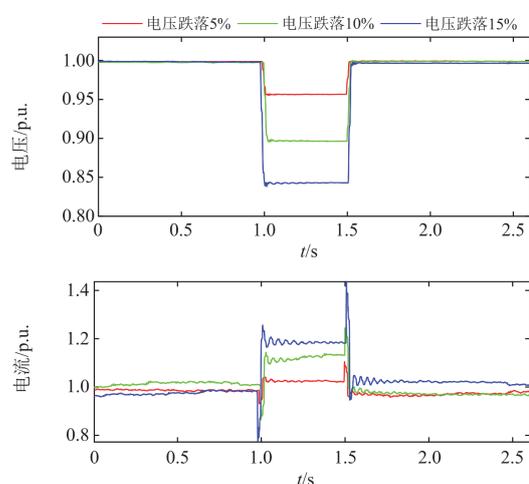
Fig. 3 Principle diagram of E load

E 负荷属于主动负荷^[8], 即功率不仅受输入电压和频率的影响, 还受设备内部控制而变化, 其特性可用式(1)统一表示。

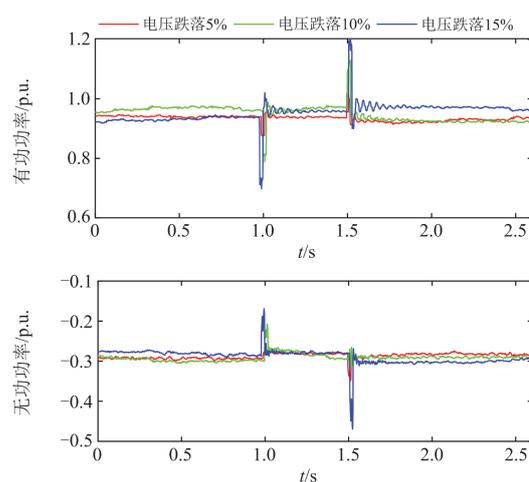
$$y = g(U, f, C) \quad (1)$$

式中: y 为负荷的有功或无功功率; U 为母线端口电压; f 为系统频率; C 为控制参数, 表示设备内部或外部信号控制; $g(\cdot)$ 为负荷功率的函数表达式。

E 负荷具有高度的非线性以及较小的惯性时间常数, 与传统负荷在动态响应上表现出显著差异。图 4 给出了动模试验环境下, 典型 E 负荷在电压暂降过程中的实测动态响应。当受到外部扰动时, 在电压突变瞬间 E 负荷的输出电流无法及时跟上电压变化, 因而功率呈现出冲击特性。



(a) E 负荷电压、电流特性



(b) E 负荷有功、无功响应

图 4 典型 E 负荷的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of the typical E load

目前在大电网仿真计算中一般将 E 负荷当作静态负荷处理^[27]。然而, 由图 4 可见, 静态负荷模型

无法准确描述其动态特征。当 E 负荷占比较低时，对电网整体特性的影响不大，实际仿真时，技术人员可采用该等效方法以提升仿真速度。但高比例 E 负荷接入后，若仍使用传统模型表征，会导致明显的仿真误差。因此必须充分考虑其与传统负荷在动态特性上的区别。

2.1 电力电子接口负荷的机理模型

现有机理性模型研究主要包含两个方面：1) 针对某一种设备单独进行详细建模，研究重点是变频器等旋转类设备建模；2) 从整体角度出发，构建包含电力电子接口等效负荷模型的综合模型。文献[28]建立了变频电机的简化模型，该模型考虑了变频器的标量电压/频率控制特性。在此基础上，文献[29]将变频电机简化模型与静态负荷、传统感应电机并联构成综合模型。文献[30]提出一种计及整流器控制特性的变频电机模型，并验证了该模型在大扰动下的有效性。文献[31]建立了变频空调的详细电气模型，并指出在电压暂降过程中空调会吸收大量的功率，保持电压/频率比值恒定以维持电磁转矩；文献[32-33]通过实验分析了电压跌落开关电源的动态特性，但未给出具体的设备模型。文献[34]建立了开关电源的简化等效模型。文献[35]基于统计综合法建立了 E 负荷的综合模型，其中负荷包括 LED 灯、VFD 设备、开关电源以及分布式光伏，该模型具有较高的准确度。

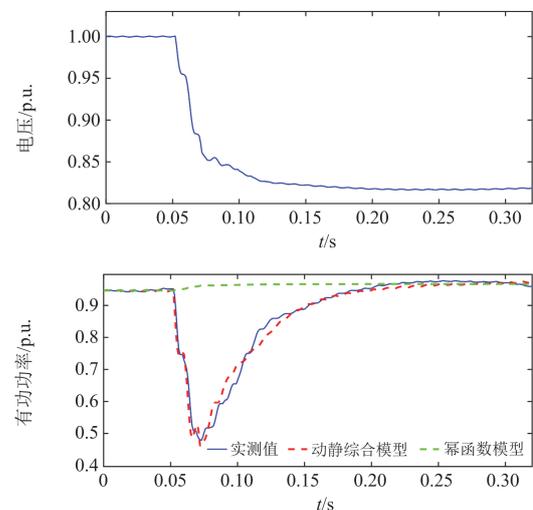
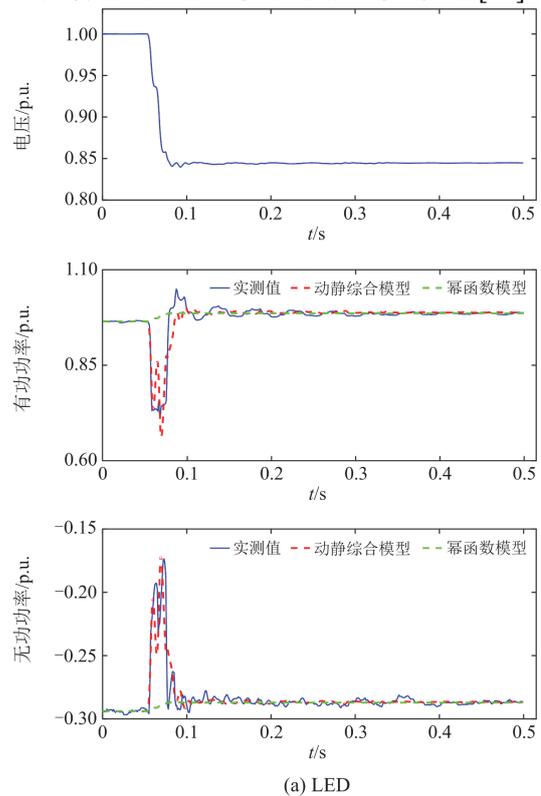
E 负荷的机理模型通常考虑设备端口的电气特性，在对内部电路拓扑进行简化的基础上，构建微分方程或代数方程以表征负荷特性。机理模型的物理意义明确，参数具有良好的可解释性，但实际应用中，在获取设备电路结构和参数上存在困难。

2.2 电力电子接口负荷的非机理模型

在非机理模型方面，文献[36]基于动模实验和详细模型仿真曲线，以差分方程的形式建立了 VFD 的等效模型。文献[37]提出了一种针对电力电子设备的线性化建模方法，并建立了 VFD 的七阶传递函数模型，问题在于模型方程的数量较多、阶次过高，给参数辨识带来不便。文献[38]通过分析低压母线的故障录波数据，基于 E 负荷消耗功率的平均值建立了有功功率的分段指数恢复模型，局限性在于缺乏对无功特性的准确描述。文献[39]提出一种 VFD 的等效模型，运用独立的一阶传递函数分别描述负荷在电压跌落和恢复时刻的功率冲击特性。文献[40-41]基于对实测波形的分析，分别建立了变频空调和非旋转类 E 负荷的传递函数模型；文献[42]提出了一种 E 负荷的简化模型，该模型以一阶传递函数的形式描述功率和电压间的关系，并在模型中使

用独立阻抗以表征负荷中的静态成分。文献[43]提出一种 E 负荷的动静综合模型(composite dynamic-static model, CDSM)，该模型由静态部分与动态补偿部分并联构成，通过对实测数据的拟合验证了模型的有效性，如图 5 所示。

在综合模型方面，美国西部电力协调委员会(western electric coordinating committee, WECC)提出了一种综合负荷模型(WECC composite load model, WECC CLM)^[44]，模型结构如图 6 所示。负荷由静态负荷、E 负荷和电机组成，其中电机包括 3 台不同特性的三相电机和单相电机。文献[45]给出



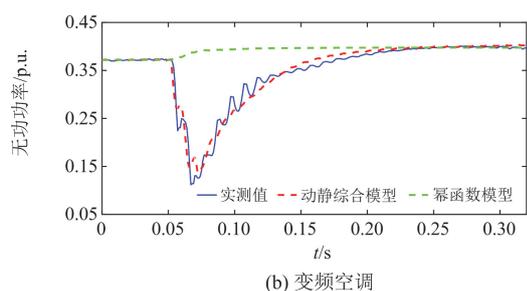
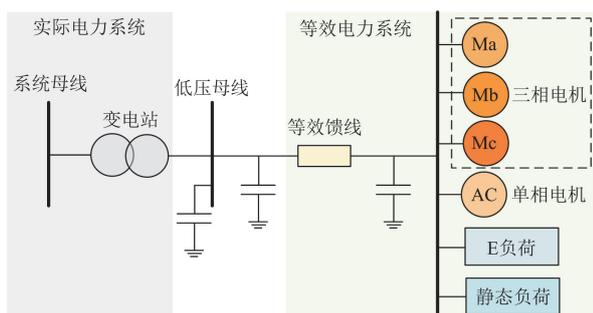
图5 动静综合模型拟合效果^[43]Fig. 5 Fitting result of the CDSM^[43]

图6 WECC CLM 结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of WECC CLM structure

了WECC CLM 的详细表达式,并在模型中增加了分布式新能源。其中, E 负荷模型简单表示为电压-功率的分段线性函数^[46],其准确性有待商榷。

2.3 进一步研究需求

综上所述,机理和非机理 E 负荷模型比较如表 1 所示。现有研究对旋转类负荷的关注较多,而对 LED 灯、开关电源等非旋转类负荷的关注尚且较少。目前对电压暂降过程中的动态特性研究较多,而对频率暂降过程中的动态特性研究较少;对小扰动动态过程下 E 负荷特性的研究较多,而大扰动下模型的适应性仍有待验证。

表 1 不同 E 负荷模型比较

Table 1 Comparison between E load models

负荷模型	特点	优势	不足
机理模型	从设备电路拓扑或控制机理建模	反映设备内部特性,可解释性强	机理分析复杂
非机理模型	从设备外特性建模	通用性和可迁移性好	物理意义欠缺

E 负荷模型的进一步研究需求包括:

1) 随着电力电子技术的发展和新型电器设备的应用, E 负荷种类将更为繁多,特性愈发复杂,模型需要具备更强的适用性和可迁移性。一方面,为适用于大电网仿真计算,有必要建立具有统一结构的 E 负荷模型。从机理分析上出发,分析各类 E

负荷的共性,在综合模型中实现 E 负荷特性的等值聚合。也可从非机理角度,将机器学习技术运用于 E 负荷模型,有效应对 E 负荷的非线性特征。另一方面,在传统电力系统仿真时,综合负荷模型通常采用一组典型参数,而实际负荷是时变的。基于电网大数据平台,运用机器学习对模型参数进行在线辨识,通过智能算法分析 E 负荷与传统负荷特性差异,识别最新负荷构成比例,以实现模型的动态更新。

2) 需要研究计及低压耐受特性的 E 负荷模型,以适应系统大扰动仿真分析需求。在系统大扰动传递到低压配电网时,根据内部控制器以及外部脱扣器的保护特性, E 负荷会表现出高/低压脱扣或高/低压穿越行为。现有模型大多基于小扰动分析开展,而针对 E 负荷的动态特性,尤其是高低压耐受特性暂不明确,导致对配电网整体负荷特性机理不明。因此建议基于动模试验与电网实测数据,分析大扰动下各类电力电子接口设备的动态特性,并在模型中充分考虑 E 负荷的高低电压耐受特性。

3) 目前 E 负荷混杂特性机理方面的研究较少。E 负荷本质上是一个混杂电力电子系统,线性与非线性并存,离散与连续并存。在微观上设备的控制电路以高频开关脉冲的形式发出离散控制信号;宏观上 E 负荷的能量、功率随时间发生连续变化,研究难点在于如何准确描述控制策略切换过程中设备产生的功率过冲特性。现阶段对 E 负荷混杂特性的机理认识不够深入,详细模型仿真中一般将其理想化、线性化处理。需要在研究各类 E 负荷混杂特性机理的基础上,建立能够描述 E 负荷混杂特性的等效模型。

3 含分布式电源的广义负荷模型

大电网与分布式电源相结合能够节省投资、降低能耗,并提高电力系统灵活性。由于各国国情不同,国际上对于分布式电源尚无统一的理解和定义。IEEE 给出的定义为:接入当地配电网的发电设备或储能装置^[47]。国家发改委颁布的《分布式发电管理暂行办法》指出分布式发电是指位于用户附近,自发自用为主、多余电量上网,以平衡调节为特征的发电设施^[48]。因此,分布式电源一般直接接入配电网侧就近给负荷供电。

当分布式电源大量、分散地接入配电网后,将改变传统的配电网拓扑结构及潮流^[49],含分布式电源的配电网潮流如图 7 所示,配电网潮流方程如式(2)所示。

$$P + jQ = (P_L + jQ_L) - (P_D + jQ_D) \quad (2)$$

式中： P 、 Q 分别为配网输入总有功、总无功功率； P_L 、 Q_L 分别为负荷消耗的有功、无功功率； P_D 、 Q_D 分别为分布式电源发出的有功、无功功率。

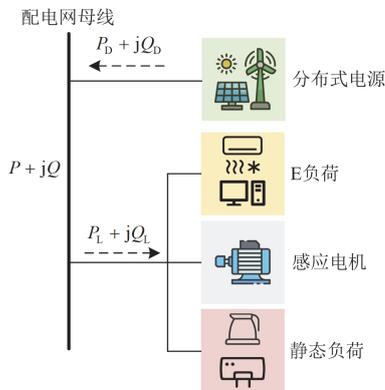


图 7 含分布式电源的配电网潮流

Fig. 7 Power flow of distribution network considering DG

当分布式电源接入配电网后，其出力可能大于负荷所消耗总功率，配电网总潮流的方向将发生翻转。单向潮流的无源配电网转变为双向潮流的有源配电网后，扰动下的响应特征有很大差别。传统综合负荷模型仅包含静态负荷和感应电机，没有考虑电源成分，从而无法准确描述含分布式电源的综合负荷特性。面向新型电力系统，必须在综合负荷模型中考虑分布式电源，而分布式电源的种类多样性和接入分散性给模型研究带来了不小的挑战。国内通常将含分布式电源的负荷模型称为广义负荷模型，国外则大多称为 ADN 等值模型^[50]，以下统称为广义负荷模型。

分布式电源还广泛应用于微电网中^[51]。微电网本质上是一个微型电力系统，主要包含分布式电源和负荷等设备，从配电网角度可看作是广义负荷节点。因此研究微电网等值模型与配电网广义负荷模型在思路上有相通之处，文献[52-56]基于机理和非机理角度建立了微电网等值模型。

3.1 含分布式电源的机理负荷模型

对单一分布式电源模型的研究是建立含分布式电源的综合负荷模型的基础。在风机模型方面，文献[57]指出在 SLM 虚拟母线上增设一台异步发电机以表征鼠笼式风机，其中发电机采用考虑电磁暂态的五阶模型。文献[58]对双馈异步风机暂态特性进行仿真分析，指出在机电暂态下可采用恒功率源进行等效描述，将其与 SLM 结合即可获得广义模型。对于含直驱永磁风机的情况，文献[59]指出直驱永磁风机通过电力电子变流器并入电网，其动态特性由变流器及控制器主导，将机械环节忽略得到风机

简化模型。

在分布式光伏模型方面，文献[60]将光伏系统简化为有功与电压相关的二阶系统，减少了待辨识参数。文献[61]将跟随型和支撑性分布式光伏等效模型并联构成广义综合负荷模型，仿真验证了模型的自描述能力和泛化能力。文献[62]提出了分布式光伏的一体化模型，而且整合了低穿模块和脱网模块，并入 CLM 形成增广综合负荷模型(generalized composite load model, GCLM)。图 8 给出了光伏接入下分别使用 GCLM 和 CLM 拟合广义负荷的动态响应，可见分布式光伏比例越大功率跌落越明显，GCLM 相比 CLM 能更准确地表征广义负荷的动态特性。此外，针对分布式燃气轮机^[63]、燃料电池^[64]、小水电集群^[65]等分布式电源的等效模型均有一些研究。

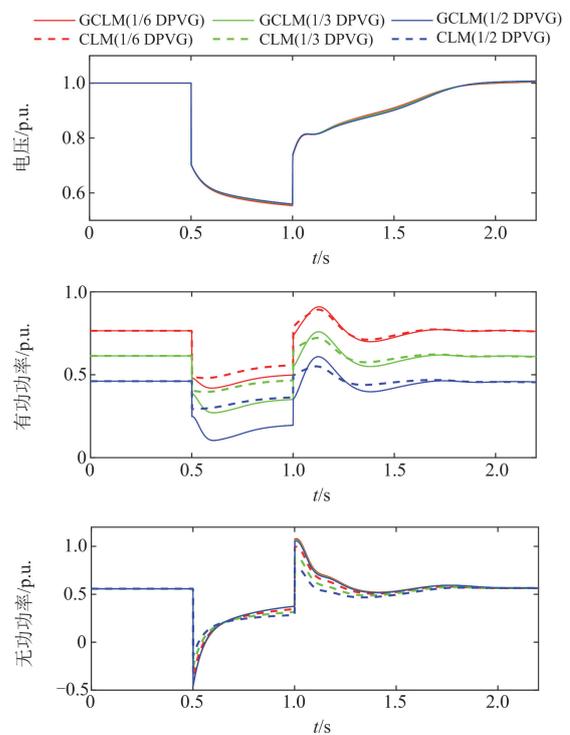


图 8 不同接入比例下含分布式光伏的广义负荷响应^[62]

Fig. 8 Dynamic response of GCLM under different PV penetration^[62]

上述研究集中于单一分布式电源及其对负荷特性的影响，多是从机理上对分布式电源进行简化等效，并将其接入配电网综合负荷。在考虑多种分布式电源的广义负荷模型方面，文献[66]在 SLM 虚拟母线上增设一台异步发电机和两种有功功率源以表征含恒速风机、燃料电池以及三相单级光伏的广义综合负荷，仿真结果表明模型描述能力较强。文献

[67]建立了适用于大扰动分析的七阶广义负荷模型, 该模型在 CLM 母线上加入一台经变流器并网的发电机以表征分布式电源。文献[68]在 SLM 基础上并联两台不同特性的等效分布式电源以构成广义负荷模型。国家能源局发布的《电力系统仿真用负荷模型建模技术要求》提出了一种新型负荷模型(new synthesis load model, NSLM)^[27], 分布式电源包括双馈风机和两类变流器型新能源, 模型结构如图9所示。其中 A 类变流器型新能源具有电压故障穿越特性, B 类变流器型新能源具有封波特性, 此外 NSLM 还考虑了储能系统。可见, 机理性模型大多是通过将分布式电源并入综合负荷模型, 构成广义负荷模型, 以描述含分布式电源的广义负荷特性。

在实际应用方面, 针对新能源发电设备并网特性差异大, 部分厂家生产的新能源控制器存在“黑匣化”的问题, 中国电科院构建了四大类覆盖超百种型号的新能源模型库, 建立了新能源电源的结构化模型, 包括光伏、直驱风电机组、鼠笼风电机组和双馈风电机组, 提高了分布式新能源通用模型的准确度以及对于大规模新能源仿真的灵活度^[69]。

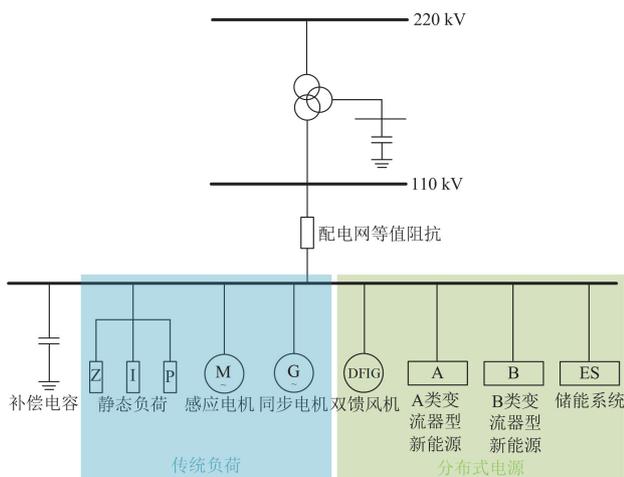


图9 新型综合负荷模型结构示意图

Fig. 9 Diagram of NSLM structure

3.2 含分布式电源的非机理负荷模型

非机理建模基于等值方法或智能算法, 建立含分布式电源的广义负荷等值模型。文献[70]扩展了多项式模型的参数范围, 运用改进后的模型表征光伏发电系统, 并将其与静态负荷合并得到一体化模型, 有效简化了广义综合负荷模型结构。文献[71]运用改进的指数恢复模型描述广义负荷的等值动态特性, 其本质是用多项式模型系数替换原模型系数。

随着人工智能技术的发展, 也有不少研究利用智能算法直接对实测数据分析以建立输入输出模

型。文献[72]建立了数据驱动型的广义负荷模型, 该模型运用无监督学习算法, 将具有相似动态特性的数据聚类并建模; 文献[73]提出了一种适用于频率稳定分析的广义负荷动态等值模型, 基于 Prony 方法和支持向量机算法进行模型的聚合和降阶。在基于神经网络的建模方面, 早期研究多使用浅层人工神经网络建立广义负荷动态等效模型^[74]。近年来, 一些改进的神经网络算法也应用于负荷建模。文献[75]运用经改进的艾尔曼 Elman 神经网络(Elman neural network, ENN)建立了分布式电源的统一等效模型, 并开发了适用于 PSASP 的应用接口; 文献[76]运用循环径向基函数神经网络建立广义负荷模型, 将电压和功率作为网络输入, 功率变化量作为输出, 能够描述广义负荷功率的动态微分变化特性; 文献[77-78]分别基于长短期神经网络和循环神经网络建立了广义负荷的等值模型。上述基于数据驱动模型研究, 优势在于无需知晓具体的模型结构, 具有一定的通用性, 而缺点在于难以获知真实物理系统的机理, 实际工程应用还较为少见。

3.3 进一步研究需求

分布式电源种类繁多, 不同分布式电源的原理和动态特性各有不同, 这给广义负荷模型研究带来了挑战。机理性模型和非机理性模型有着各自的优势和特点, 两者的比较如表2所示。

表2 不同含分布式电源的广义负荷模型比较
Table 2 Comparison between different generalized load models considering DG

负荷模型	特点	优势	不足
机理模型	基于 DG 特性建模, 接入综合负荷模型	反映 DG 的物理过程, 参数有明确物理意义	考虑多种 DG 时模型较为复杂
非机理模型	基于等值算法或智能算法建立等效模型	反映总体外特性, 描述能力强, 扩展性好	无法反映 DG 的内部机理

分布式电源大规模接入配电网, 与用电负荷深度耦合, 使得配电网的动态特性更为复杂。建立准确的广义负荷模型是研究含分布式电源的广义综合负荷特性的基础, 未来可从以下几个方面开展研究工作。

1) 分布式光伏、风机等新能源发电的动态特性复杂。一方面, 不同厂家对分布式新能源产品的控制参数、保护整定设计有所不同, 导致分布式电源的涉网性能差异明显; 另一方面, 分布式新能源的动态特性还和故障时出力情况有关。并网 DG 在同一故障下可能出现部分电源穿越, 而另一部分电源脱网的情况。现有研究更多关注单机的故障穿越及

脱网行为，而电网仿真更需要表现分布式电源在故障下整体特征的等效聚合模型。为更加准确地描述广义综合负荷特性，未来模型中需要考虑分布式电源高低压穿越与脱网特性的统一等效表征。

2) 分布式新能源出力具有显著的不确定性。一方面，新能源对气候条件高度敏感，具有间歇性和随机性。另一方面，海量的分布式电源可作为新型调节资源参与电网调控^[79]。参与电网调控的分布式电源功率特性与正常出力时有明显差异。因此，模型参数具备很强的时变性，甚至模型结构也要根据实际出力情况进行调整。建议结合气象数据与电网实时量测数据，运用智能算法分析分布式电源出力行为新特性，充分考虑气候因素、电网调控因素对其影响，及时更新校正模型成分比例、参数及结构，以贴近新型电力系统的实际运行情况。

3) 储能技术在建设双碳目标的过程中发挥重要支撑作用。分布式储能系统接入配电网，能够平抑新能源出力波动性，并参与到系统调峰、调频等辅助服务中^[80]。分布式储能同属于分布式电源，但其特殊性在于储能系统具有功率双向性，且不同形式的分布式储能特性亦有差异。其中，电池储能已获得广泛应用，飞轮、超级电容等储能技术仍处于研发规划阶段^[81]。配电网接入大规模的分布式储能，将对综合负荷的动态特性产生明显影响。现有考虑储能系统的广义负荷模型研究主要针对电池储能系统^[82-83]，未见包含其他储能系统的建模工作。随着新能源装机容量的提升和储能技术的发展，分布式储能系统的规模将持续扩大。因此，需要进一步研究各种分布式储能系统的特性，并计及储能的能量管理策略，建立综合考虑储能与分布式发电的广义负荷模型。

4 其他方面的负荷模型

4.1 电磁暂态方面的负荷模型

机电暂态和电磁暂态仿真是电力系统仿真分析的重要手段。机电暂态仿真步长一般取 10 ms，状态量为基频相量，适用于分析电压稳定、频率稳定等问题，无法表征电力系统在非基频或不对称故障下的特性。电磁暂态仿真时间尺度为微秒级，模型状态量为三相瞬时值，适应于分析快速暂态过程、宽频特性以及不对称故障。机电暂态和电磁暂态仿真差异总结如表 3 所示。

在传统电力系统仿真中，基于基频相量法建立的机电暂态模型在简化了全系统状态方程的同时保留了关键动态过程信息，能够较好地描述电力系统的动态过程。然而，机电暂态模型的仿真步长为毫

表 3 机电暂态仿真和电磁暂态仿真比较

Table 3 Comparison of electromechanical transient simulation and electromagnetic transient simulation

类型	机电暂态仿真	电磁暂态仿真
仿真步长	毫秒级/10 ms	微秒级/50 μs
仿真特点	仿真速度快、满足传统电力系统仿真精度需要	仿真速度受算力限制、精度高
状态量	基频相量	三相瞬时值
软件平台	PSS/E、PSASP、BPA 等	PSCAD、PSModel、CloudPSS 等
应用场景	电压稳定、频率稳定、对称故障分析等	快速暂态过程、宽频振荡、不对称故障分析等

秒级，难以模拟电力电子器件高频开关特性。具有更高仿真精度的电磁暂态仿真将成为研究新型电力系统的重要方式。负荷作为电力系统中的主要组成部分，其动态特性对系统稳定性的影响不容忽视。因此，电磁暂态方面负荷模型研究的重要性和迫切性日益凸显。

1) 研究现状

计算机技术的飞速进步和仿真平台的发展给电磁暂态建模研究带来了良好的发展条件。在硬件平台方面，高性能 GPU^[84]、FPGA 阵列^[85]、云计算^[86]提供强大算力支持；在软件平台方面，电磁暂态仿真软件也日益成熟，主流商业软件有国外的 RTDS、RT-LAB、PSCAD，国内的电科院开发的 PSModel、清华大学研制的 CloudPSS 等。此外，为提升电磁暂态仿真计算效率，研究人员提出了基于子网解耦法、延迟插入法等并行仿真技术^[87]。

在电磁暂态仿真模型方面，现有研究大多关注发电、输电侧设备建模，在新能源场站^[88-89]、同步发电机^[90-91]、高压直流输电设备^[92]的电磁暂态模型方面研究较多，而对负荷电磁暂态模型的研究比较少。在各种负荷成分中，感应电机的电磁暂态建模研究已有一些成果，主要有考虑定转子暂态的五阶模型、忽略定子暂态的三阶模型以及忽略转子暂态的一阶模型。文献[93]采用 3 种电机暂态模型对电机起动过程进行仿真，并与实测数据对比。结果表明考虑定转子暂态的五阶模型能准确反映电机实际动态过程。文献[94]提出一种考虑主磁通饱和的电磁暂态感应电机模型，该模型具有恒参数接口电路，能够方便地接入电磁暂态仿真程序。在综合负荷的电磁暂态建模方面，有少量研究。文献[95]基于统计综合法建立了适用于电磁暂态仿真的综合负荷模型，包括单相电机、三相电机、照明灯、开关电源等设备，对于三相短路以及不对称故障均有良好的描述能力。在此基础上，文献[96]实现了对居民、商

业负荷的聚合。

此外, 部分研究建立了适用于电磁暂态仿真的动态相量模型。动态相量建模基于傅里叶变换将快变的瞬时量构造为慢变的动态相量, 从而保留主导频率中的信息而忽略部分高频信息。动态相量模型的精度高于机电暂态模型, 而仿真速度快于详细电磁暂态模型^[97]。文献[98]基于正负序分量控制分离策略, 建立了分布式电源的动态相量模型。文献[99]建立了含逆变器的动态相量微网模型, 适用于分析不平衡状态下的暂态响应, 其中负荷使用动态相量形式的恒阻抗模型。需要说明的是, 动态相量模型是否属于电磁暂态模型目前仍存在争议, 现阶段将动态相量模型看作是除机电暂态和电磁暂态模型外的一种补充更为合适。

2) 研究需求

一方面, 需要开展 E 负荷、分布式电源等新型负荷的电磁暂态模型研究。新型负荷的电磁暂态模型应具备时域耦合性, 能够准确表征设备在不同时间尺度上的动态行为, 需要涵盖微秒级的开关过程和毫秒级的系统响应特性。此外, 部分新型负荷设备的控制器电路和参数难以获取, 给机理建模带来困难。为此, 可基于机理分析构建模型框架, 联合数据驱动方法获取并校正模型的未知参数, 运用融合方法建立更具实用价值的电磁暂态负荷模型。

另一方面, 在新型电力系统的电磁暂态仿真研究中, 仿真精度与仿真效率的矛盾将愈发凸显。若仿真技术充分发展, 算力资源突破瓶颈, 自然应采用全电磁暂态模型以获得高精度计算结果。在算力资源相对有限的情况下, 为优化电磁暂态仿真的计算效率, 有必要研究电磁-机电混合负荷模型, 如图 10 所示, 适当简化部分动态行为。即对电力电子设备等响应速度快的负荷建立电磁暂态模型, 对静态负荷等传统负荷仍使用机电暂态模型, 既能保证整体的仿真精度, 又能有效提高仿真效率, 从而实现

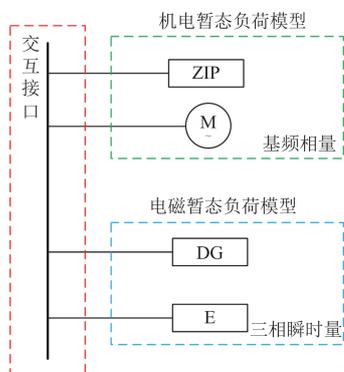


图 10 电磁-机电混合负荷模型

Fig. 10 Electromagnetic-mechatronic hybrid load model

电网的大规模电磁暂态仿真, 满足新型电力系统的分析需求。

4.2 短路电流方面的负荷模型

短路电流计算是电力系统设计和分析的必要方法之一, 可为电网设备选型和保护整定提供重要参考。随着电力电子设备的大量应用, 负荷总量的持续增长以及特高压网架的不断建设, 系统短路电流超标问题将日益严重。同时 E 负荷、分布式电源故障特性对短路电流计算也将产生明显影响^[100-101], 因此短路电流方面的负荷模型研究需要得到进一步重视。

1) 研究现状

实际短路电流计算应用中, 不同国家、组织和企业机构制定了不同的执行标准。国际标准主要有电工技术委员会制定的 IEC 60909-2016^[102]、美国国家标准学会(American national standards institute, ANSI)与 IEEE 联合制定的 ANSI/IEEE C37&UL489 系列标准^[103]、IEEE 3002.3-2018 系列标准^[104]。国内标准有国标 GB/T 15544-2023, 行业标准 DL/T 559-2018 等^[105-106]。上述标准对负荷的处理不尽相同, 具体如表 4 所示。

表 4 不同短路电流计算标准对比

Table 4 Comparison of different short-circuit current calculation standards

标准	特点	负荷处理方式
IEC 60909-2016	提出了新能源短路电流计算方法	计及感应电机和静态负荷的影响
ANSI/IEEE C37&UL489	给出了高压断路器的整定方法	计及大型感应电机的影响并给出校正系数
IEEE 3002.3-2018	适用于工商业小型电力系统短路电流计算	给出了感应电机的短路计算模型及推荐参数
GB/T 15544-2023	基于 IEC 60909-2016 标准修订	给出了感应电机的等值模型
DL/T 559-2018	适用于高压继保装置的整定	不计及负荷电流影响

2016年修订后的 IEC 标准考虑了感应电机的影响, 并给出了新能源短路电流计算方法, 将双馈风机等效为电压源, 将直驱风机和光伏等效为电流源模型。最新版国标在 IEC 标准基础上进行了适当修改, 在负荷模型的选取上大体相同, 并给出了配电网感应电机的等值方法。

在计算仿真程序方面, 目前主流短路电流计算仿真程序包括 ETAP、PSD-SCCP 以及 PSASP 等, 其对负荷模型的处理也有所不同。ETAP 软件采取基于案例的方式进行计算, 内置了多种短路计算国际标准供参考, 并且能够选择是否考虑电动机的影

响。PSD-SCCP 可基于潮流或基于案例计算短路电流。在负荷模型的选择上,有考虑静态负荷、综合负荷或不考虑负荷等多种计算模式供用户选择^[107]。PSASP 在基于案例的短路计算中忽略负荷影响,在基于潮流的短路计算中可以选择静态负荷或综合负荷。综上,主流短路计算仿真软件提供了多种考虑负荷的计算方案,选用的负荷模型集中在静态负荷和含感应电机的综合负荷。

在理论研究方面,已有研究人员关注负荷对短路电流的影响。文献[108]仿真发现负荷动态特性对三相短路周期分量的初始值和衰减速度影响较大;文献[109]对河南电网短路电流进行仿真计算,结果表明考虑感应电机时系统短路点等值阻抗有所降低,短路电流计算结果高于恒阻抗模型;文献[110]分析了接入不同电压等级的感应电机在三相短路中的反馈短路电流,结果表明接入 6/10 kV 线路的感应电机具有较大的短路电流初值且衰减较慢,在计算 220 kV 以上电网短路电流时应计及其影响。在分布式电源方面,文献[111]分别建立了异步型和逆变型 DG 的短路计算模型,指出异步型电源的模型选取需考虑撬棒保护动作情况;文献[112]提出在短路电流计算时可将旋转型 DG 等值为电压源串联次暂态电抗的形式,而逆变型 DG 应等效为故障电流源;文献[113]研究了逆变型 DG 在对称和不对称故障下的电流特性,对比分析了不同控制方式对 DG 故障响应的影响;文献[114]建立了换流器型分布式电源 (inverter based distributed generation, IBDG) 在不对称短路故障下的通用等效模型,提出了含 IBDG 配电网的不对称短路电流通用计算方法。

2) 研究需求

现有研究对短路电流计算中的负荷模型适应性、感应电机和分布式电源等设备对短路电流的影响进行了探讨。后续研究需求包括以下两个方面。

(1) 需要研究新型负荷在短路故障中的特性,建立其短路电流模型。不同类型、不同工作方式的分布式电源的短路电流特性有所差异,而且新能源接入和出力占比的不断波动会导致故障场景多变。因此,模型对不同工况下设备特性的适应性需要进一步开展研究。目前针对感应电机、逆变型分布式电源在短路计算中的影响分析较多,对于变频电机等 E 负荷的研究却鲜有报道。与传统负荷相比, E 负荷在短路故障时的特性直接受其控制策略与保护特性影响,对短路电流造成助增或外汲作用,因而在模型中必须考虑其影响。

(2) 需要研究适用于短路电流计算的综合负荷模型。在新型电力系统中,配电网拓扑复杂多变,

含有高渗透率分布式电源的配电网潮流分布也有重大变化,对保护装置的整定和系统稳定性分析带来困难。有必要在新型负荷设备建模研究的基础上,建立适用于电网短路电流计算的综合负荷模型,模型应计及感应电机、E 负荷以及分布式电源的影响。同时,建议尽快开展标准化研究,制定行业统一的计算标准。

4.3 谐波方面的负荷模型

E 负荷和分布式电源占比的不断提高,将导致配电网电流含有大量谐波,造成谐波电流放大、波形畸变等谐波污染问题。谐波污染不仅会损坏精密负荷设备,还会严重影响电能质量并可能导致继电保护设备发生误动作^[115-116]。随着新型电力系统建设的不断推进,配电网谐波治理问题将面临严峻挑战,而建立准确的负荷谐波模型是治理电网谐波和改善电能质量的基础。

1) 研究现状

谐波模型分为机理性时域模型、机理性频域模型以及非机理模型。机理性模型中的时域模型通过分析设备的电路拓扑,建立电气量之间在时域上的关系式。国际大电网会议组织曾提出一种负荷谐波模型,采用基频等值阻抗表征负荷的谐波响应^[117];文献[118]将单相模型扩展到三相负荷谐波模型。也有研究关注特定设备的谐波建模,比如电弧炉等。电弧炉具备高效的生产效率和良好的经济性,在冶炼工业中获得了广泛应用,缺点是在运行过程中会产生巨大的功率冲击并伴随着大量谐波。文献[119]基于能量守恒和混沌动态特性建立了超高功率电弧炉动态模型;文献[120]提出一种基于电子连续性的电弧炉模型,能较好地反映电弧的非线性以及不确定性。综上,机理时域模型从电路原理出发,通过列写微分方程的方式描述负荷谐波特性。而在描述电路拓扑复杂或未知情况下的负荷谐波时,时域模型的效果不理想。

频域模型同样基于电路拓扑以及实验,区别于其目标是获得端口各次谐波电压与电流在频域中的关系式,负荷谐波在频域下的伏安特性可表示为

$$\dot{I}_k = F_k(\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n, C) \quad (3)$$

式中: \dot{I}_k 为谐波源的第 k 次谐波电流分量; \dot{U}_1 为谐波源的基波电压分量; \dot{U}_2 为谐波源的二次电压分量; \dot{U}_n 为谐波源的高次谐波电压分量; C 为谐波源的运行工况控制参数; $F_k(\cdot)$ 为负荷第 k 次谐波的伏安特性函数。

早期的频域模型将各次谐波等效为单独的受控电流源,将基频电流作为控制量^[121]。此类模型形式

简单, 但无法反映各次谐波间的交互耦合作用, 目前使用较少。为有效表征各次谐波的交互影响, 文献[122]提出了交叉导纳矩阵模型, 该模型通过建立能描述各次谐波电流和电压线性化关系的导纳矩阵以研究负荷谐波。后续研究人员基于该模型, 开展了对计算机、节能灯等典型家用负荷、三相不控整流负荷以及电压源型换流器的谐波建模工作^[123-126]。交叉导纳矩阵模型的出现促进了负荷谐波模型研究发展, 但其局限性在于, 获取导纳矩阵要建立在负荷可线性化或近似线性化的基础上, 因此对于高度非线性化以及强时变性负荷的适应性欠佳。

非机理性谐波模型主要通过优化方法和人工智能算法来构建输入输出量间的关系式, 以反映负荷对外呈现的谐波特征。此类方法的关键点: (1) 需要大量的实测数据以供建模使用; (2) 选取合适算法从实测数据中挖掘各物理量之间的隐含关系。在算法方面, 最小二乘法及改进方法、支持向量机、神经网络及相关智能算法均有研究与应用^[127-130]。不同类型的谐波模型特点总结如表 5 所示。

表 5 不同负荷谐波模型对比

Table 5 Comparison of different load harmonic models

模型类别	原理	优势	不足
时域模型	基于设备电路拓扑及元件参数	机理清晰, 可解释性强	难以处理具有复杂电路或参数未知的设备
频域模型	基于频域下谐波源端口的伏安特性	建模简单, 交叉导纳矩阵可反映谐波耦合特性	无法处理高度非线性化、时变性负荷
非机理模型	基于数据驱动方法建立黑箱模型	适用性良好, 对非线性负荷有效	可解释性欠缺, 需要确保数据规模及可靠性

2) 研究需求

目前, 从机理、非机理、时域和频域等多个角度开展负荷谐波模型研究, 取得了丰富的成果, 但面向新型电力系统的负荷谐波模型仍有尚需深入研究的问题。

一方面, 需要考虑负荷谐波的不确定性。从负荷总体角度考虑, 某一时刻接入电网的负荷种类与数量具有不确定性, 并且用电行为也具有随机性, 负荷谐波叠加后具有高度不确定性。因此, 如何描述负荷群体产生谐波的不确定性是研究重点。已有学者运用概率统计方法对常见的居民和工业负荷谐波不确定性问题进行初步探索^[131], 用概率方法表征负荷谐波的随机性行为。随着分布式新能源的大规模接入, 并网电力电子装置将给配电网注入大量谐波, 同时分布式光伏、风机等新能源本身具有很强

的间歇性和波动性, 将进一步加剧谐波的随机性。因此需要关注分布式电源及其电力电子装置的谐波模型研究, 并且在谐波随机性问题中考虑分布式电源的影响。

另一方面, 需要研究负荷谐波与电网背景谐波的交互影响。传统负荷谐波模型主要用于表征谐波源, 缺少对谐波交互作用的描述。电网背景谐波与负荷谐波交互后将产生激励作用, 加剧谐波振荡。为此, 在未来的研究工作中, 需要明晰谐波交互作用机理, 构建能够描述谐波源之间、谐波源与电网背景谐波交互作用的负荷谐波模型。

此外, 常规的谐波模型所关注的一般是数次到数十次的整数次谐波, 面向新型电力系统宽频振荡时, 考虑间谐波的负荷模型研究也需要得到重视。在新型电力系统中, 高比例新能源并网和电力电子设备应用导致系统宽频振荡问题日益严重, 次同步振荡和高频谐振现象频发。而且配电网和发电、输电网络间产生相互作用, 加剧了系统的宽频振荡^[132-133]。宽频振荡的特点是频率范围宽, 振荡机理复杂, 对系统危害大。对于宽频振荡分析中的负荷模型, 在电网正常运行时难以得到各频率下的响应特性, 因此在获取模型参数时可参照同步发电机参数辨识所用的静态频域响应方法(standstill frequency response tests, SSFR)^[134], 即在负荷侧安装相应装置, 逐次产生不同频率的正弦交流信号。比如, 频率范围为[0.001,1000] Hz, 选取合适的步长并测量各频率下的电压与电流以获得频域函数点值, 通过拟合获取传递函数的系数并推算对应的参数, 从而保证覆盖足够的频宽范围。

5 结语

近年来, 随着“双碳”目标的提出和新型电力系统的建设, 电力系统呈现出高比例新能源和高比例电力电子特征, 出现了具有新特性的新型负荷, 因此负荷建模迎来了新的挑战。有必要面向新型电力系统开展负荷模型研究工作。本文阐述了负荷发生的变化, 分析了负荷模型面临的挑战, 从机理和非机理模型的角度总结了两类典型的新型负荷模型——E 负荷模型和含分布式电源的广义负荷模型, 介绍了三类面向新型电力系统仿真新需求的专用负荷模型。对于未来负荷模型研究的展望归纳如下所述。

1) 需要建立准确高效的新型负荷模型。新型电力系统中 E 负荷和分布式电源在配电网负荷的占比将越来越高, 对这两类新型负荷的模型研究是未来一段时间内研究的重点和热点。在模型结构方面,

需要根据设备的特性和模型的适用场景选择合适的机理或非机理模型以描述负荷特性。同时,无论是哪种模型结构,都必须注重模型的精确性与简洁性之间平衡。

2) 需要面向新型电力系统建立适用于特定研究需求下的负荷模型。首先,负荷侧需要开展对电磁暂态方面的负荷模型研究,建立适用于新型电力系统仿真的机电-电磁暂态负荷模型;其次,在我国负荷用电量快速增长和新型负荷占比提升的背景下,短路电流计算中所用的负荷模型需要更新;最后,配电网的谐波超标问题需要得到进一步重视,有必要开发能够表征新型负荷特性、负荷与电网之间交互作用的负荷谐波模型,并且需要研究适用于电网宽频振荡分析的新型负荷模型。

参考文献

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill, 1994.
- [2] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 汤涌. 电力负荷的数学模型与建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] JU Ping, XIA Shiqiu, JIN Yuqing, et al. Analytic formulae for estimating the motor proportion of a load model under a small disturbance[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems: 1-9[2024-06-10]. DOI:10.17775/CSEEJPES.2021.07660.
- [5] 周海强, 茆超, 鞠平, 等. 考虑配电网的综合负荷模型可辨识性分析[J]. 电力系统自动化, 2008(16): 16-19, 77. ZHOU Haiqiang, MAO Chao, JU Ping, et al. An identifiability analysis of a synthetic load model with the distribution network considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 16-19, 77.
- [6] 赵静波, 鞠平, 施佳君, 等. 电力系统负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 87-94. ZHAO Jingbo, JU Ping, SHI Jiajun, et al. Review and prospects for load modeling of power system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 87-94.
- [7] ANMAR A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Load modeling—a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5986-5999.
- [8] 鞠平, 郭德正, 曹路, 等. 含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 367-376. JU Ping, GUO Dezheng, CAO Lu, et al. Review and prospect of modeling on generalized synthesis electric load containing active loads[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 367-376.
- [9] 董坤, 赵剑锋, 孙睿晨, 等. 含新型负荷元件的电力负荷建模研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 70-83. DONG Kun, ZHAO Jianfeng, SUN Ruichen, et al. Research status and prospects of electric power load modeling including new load elements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 70-83.
- [10] 王放放, 杨鹏威, 赵光金, 等. 新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 189-198. WANG Fangfang, YANG Pengwei, ZHAO Guangjin, et al. Development and challenge of flexible operation technology of thermal power units under new power system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 189-198.
- [11] 王臻, 刘东, 徐重西, 等. 新型电力系统多源异构数据融合技术研究现状及展望[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 1-15. WANG Zhen, LIU Dong, XU Chongyou, et al. Status quo and prospect of multi-source heterogeneous data fusion technology for new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 1-15.
- [12] 沈豫, 韩钟宽, 曾振松, 等. 基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 102-111, 128. SHEN Yu, HAN Zhongkuan, ZENG Zhensong, et al. Low-carbon economic dispatching of power systems based on fuzzy WCVaR[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 102-111, 128.
- [13] 任大伟, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3831-3839. REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [14] SU Changsheng, YIN Chunya, LI Fengting, et al. A novel recovery strategy to suppress subsequent commutation failure in an LCC-based HVDC[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 38-51.
- [15] 王智伟, 张振宇, 李征, 等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的 DSSC 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 179-187. WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 179-187.
- [16] 李玉龙, 杨明, 杨倬, 等. 抑制谐波谐振的并网逆变器

- 机侧电流反馈的 CVFAD 设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 125-136.
- LI Yulong, YANG Ming, YANG Zhuo, et al. Design method for CVFAD of grid-connected inverter-side current feedback with harmonic resonance suppression[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 125-136.
- [17] 郭庆来, 兰健, 周艳真, 等. 基于混合智能的新型电力系统运行方式分析决策架构及其关键技术[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 1-13.
- GUO Qinglai, LAN Jian, ZHOU Yanzhen, et al. Architecture and key technologies of hybrid-intelligence-based decision-making of operation modes for new type power systems[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 1-13.
- [18] 2023 年全社会用电量同比增长 6.7%—国家能源局 [EB/OL]. [2024-06-10]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/18/c_1310760885.htm.
- [19] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 195-204.
- SHU Yinbiao, XIE Dian, ZHAO Liang, et al. Re-electrification in China under the carbon neutrality goal[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2022, 24(3): 195-204.
- [20] 国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知. 中华人民共和国国务院办公厅 [EB/OL]. [2024-06-10]. http://www.scio.gov.cn/zdgz/jj/202309/t20230914_769431.html.
- [21] 梁梓鹏. 电力电子混杂系统组合特性与功率变换方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- LIANG Zipeng. Research on combination characteristics and power conversion method of hybrid power electronics system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [22] PINTHURAT W, HREDZAK B, KONSTANTINOU G, et al. Techniques for compensation of unbalanced conditions in LV distribution networks with integrated renewable generation: an overview[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 214: 108932.
- [23] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161.
- LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [24] 陈国平, 李明节, 董昱, 等. 构建新型电力系统仿真体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6535-6551.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, DONG Yu, et al. Research on the simulation technology architecture for the new-type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6535-6551.
- [25] 李亚楼, 张星, 胡善华, 等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 33-42.
- LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 33-42.
- [26] 田莞菘, 李建国, 张雅静, 等. 基于无源控制的并网逆变器特定次谐波电流抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 215-222.
- TIAN Yuansong, LI Jianguo, ZHANG Yajing, et al. Selective harmonic current suppression method for grid-connected inverters based on passivity-based control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 215-222.
- [27] 国家能源局. 电力系统仿真用负荷模型建模技术要求: DL/T 2473—2022[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [28] PANASETSKY D, OSAK A, SIDOROV D, et al. Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control[J]. IFAC-Papers Online, 2016, 49(27): 451-454.
- [29] LIN You, WANG Yishen, WANG Jianhui, et al. Tensor-based parameter reduction of dynamic load models with variable frequency drive[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1091-1101.
- [30] LIU Yuan, VIJAY V. Modeling of rectifier-controlled induction motor drive load in transient stability simulation tools[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4719-4729.
- [31] SERGIO M R S, FERNANDO L T, FABIO L D A, et al. Analysis and evaluation of residential air conditioners for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 706-716.
- [32] MEDORA N K, KUSKO A, THOMPSON M. Impact of line voltage sag on switch mode power supply operation[C] // 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, June 3-5, 2008, Singapore, Singapore: 2178-2183.
- [33] SHAREEF H, MOHAMED A, MARZUKI N. Analysis of personal computer ride through capability during voltage sags[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(12): 1615-1624.
- [34] COLLIN A J. Advanced load modelling for power system studies[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2013.
- [35] ROOS M H, NGUYEN P H, MORREN J, et al. Modeling and experimental validation of power electronic loads and DERs for microgrid islanding simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2279-2288.

- [36] HUANG Lei, CHEN Qian, JU Ping, et al. Research on load model of VF based motor drive[C] // 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), September 28-October 1, 2016, Wollongong, NSW, Australia: 1-5.
- [37] LIANG Xiaodong. Linearization approach for modeling power electronics devices in power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1003-1012.
- [38] RYLANDER M, GRADY M W, ARAPOSTATHIS A, et al. Power electronic transient load model for use in stability studies of electric power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 914-921.
- [39] MITRA P, RAMASUBRAMANIAN D, GAIKWAD A, et al. Modeling the aggregated response of variable frequency drives (VFDs) for power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2631-2641.
- [40] DIAO Honghui, JIN Yuqing, JU Ping, et al. Simplified modeling of an inverter air conditioner based on experimental data[C] // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), September 20-23, 2020, Nanjing, China: 1-5.
- [41] RUAN Wenjie, JIN Yuqing, JU Ping, et al. Simplified dynamic model of the electric load supplied by a switching power supply[C] // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), September 20-23, 2020, Nanjing, China: 1-5.
- [42] TAO Jinyu, JIN Yuqing, JU Ping. A low-order simplified model of power-electronic-interfaced loads[C] // 2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), December 16-18, 2022, Shanghai, China: 1-5.
- [43] 鞠平, 杨杰, 金宇清, 等. 电力电子接口负荷的动静综合模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 9-14.
- JU Ping, YANG Jie, JIN Yuqing, et al. Composite dynamic-static model of power electronic interfaced loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 9-14.
- [44] KOSTEREV D, MEKLIN A. Load modeling in WECC[C] // 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, GA, USA: 576-581.
- [45] MA Zixiao, WANG Zhaoyu, WANG Yisheng, et al. Mathematical representation of WECC composite load model[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 1015-1023.
- [46] WANG Chong, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. SVM-based parameter identification for composite zip and electronic load modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 182-193.
- [47] PEPERMANS G, DRIESEN J, HAESLONCKX D, et al. Distributed generation: definition, benefits and issues[J]. Energy Policy, 2005, 33(6): 787-798.
- [48] 发展改革委关于印发《分布式发电管理暂行办法》的通知. 中国政府网[EB/OL]. [2024-06-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2515010.htm.
- [49] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
- HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [50] FULGÊNCIO N, MOREIRA C, CARVALHO L, et al. Aggregated dynamic model of active distribution networks for large voltage disturbances[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178: 106006.
- [51] WANG Chong, ZHANG Zheng, ABEDINIA O, et al. Modeling and analysis of a microgrid considering the uncertainty in renewable energy resources, energy storage systems and demand management in electrical retail market[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102111.
- [52] 鞠平, 蔡昌春, 曹相芹. 基于物理背景的微网总体模型[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 7-14.
- JU Ping, CAI Changchun, CAO Xiangqin. General microgrid model based on physical background[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 7-14.
- [53] CHÁVARRO-BARRERA L, PÉREZ-LONDOÑO S, MORA-FLÓREZ J. An adaptive approach for dynamic load modeling in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2834-2843.
- [54] ZAKER B, GHAREHPETIAN G B, KARRARI M. A novel measurement-based dynamic equivalent model of grid-connected microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2032-2043.
- [55] CONTE F, D'AGOSTINO F, MASSUCCO S, et al. Experimental validation of a dynamic equivalent model for microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2202-2211.
- [56] LI Yunlu, GUERRERO J M, YANG Junyou, et al. Dynamic equivalent modeling for black-box microgrids under multi-operating-point by using LSTM[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(2): 639-648.

- [57] 张剑, 孙元章. 含有分布式电源的广义负荷建模[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 41-46.
ZHANG Jian, SUN Yuanzhang. Generalized load modeling considering wind generators connected to distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 41-46.
- [58] 徐振华, 李欣然, 宋军英, 等. 考虑双馈风电机的配网广义综合负荷建模[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 234-242.
XU Zhenhua, LI Xinran, SONG Junying, et al. Load modeling considering doubly-fed induction generator (DFIG) integrated into distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 234-242.
- [59] 潘学萍, 冯徐徐, 鞠平, 等. 含直驱永磁风电场的配电网广义负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 62-68.
PAN Xueping, FENG Xuxu, JU Ping, et al. Generalized load modeling of distribution network integrated with direct-drive permanent-magnet wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 62-68.
- [60] 屈星, 李欣然, 盛义发, 等. 面向广义负荷的光伏发电系统等效建模研究[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2143-2150.
QU Xing, LI Xinran, SHENG Yifa, et al. Research on equivalent modeling of PV generation system for generalized load[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2143-2150.
- [61] 陈忠玉, 徐晋, 汪可友, 等. 计及跟随型和支撑型分布式光伏的广义综合负荷模型及两阶段参数聚合等效方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 86-93.
CHEN Zhongyu, XU Jin, WANG Keyou, et al. Generalized composite load model and two-stage parameter aggregation and equivalent method considering grid-following and grid-forming distributed photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 86-93.
- [62] SUN Yidong, ZHANG Jun, LUO Jing, et al. Simplified model of distributed PV generation and influence analysis on load characteristics[C]//2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), August 20-22, 2021, Shanghai, China: 497-501.
- [63] 马亚辉, 李欣然, 李小菊, 等. 含微型燃气轮机发电的配电网综合负荷建模[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(11): 58-64.
MA Yahui, LI Xinran, LI Xiaoju, et al. Synthesis load modeling of distribution network with microturbine generation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(11): 58-64.
- [64] 李欣然, 李小菊, 马亚辉, 等. 一种含燃料电池发电系统的广义综合负荷模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 44-49, 107.
LI Xinran, LI Xiaoju, MA Yahui, et al. A generalized synthesis load model considering fuel cell generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 44-49, 107.
- [65] 张华云, 王琦, 王泽忠, 等. 适用于暂态仿真的计及小水电机群的广义负荷一体化等值建模方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-11[2024-06-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232824>.
ZHANG Huayun, WANG Qi, WANG Zezhong, et al. A generalized load integrated equivalent modeling method considering small hydroelectric generation clusters for transient simulation[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-11[2024-06-10]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232824>.
- [66] 孙国霞, 张剑, 吴海江. 包含多种分布式电源的广义负荷模型辨识与适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 105-111.
SUN Guoxia, ZHANG Jian, WU Haijiang. Research on the identification and adaptation of generalized load modeling based on distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 105-111.
- [67] ZALI S M, MILANOVIĆ J V. Generic model of active distribution network for large power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3126-3133.
- [68] LAN Tiankai, SUN Huadong, WANG Qi, et al. Synthesis load model with renewable energy sources for transient stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(1):1647-1663.
- [69] WANG Weisheng, LI Guanghui, GUO Jianbo. Large-scale renewable energy transmission by HVDC: challenges and proposals[J]. Engineering, 2022, 19: 252-267.
- [70] 吴峰, 戴小妹. 计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 1-9, 46.
WU Feng, DAI Xiaomei. Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 1-9, 46.
- [71] KONTIS E O, PAPADOPOULOS T A, CHRYSOCHOS A I, et al. On the applicability of exponential recovery models for the simulation of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3220-3222.
- [72] MITRENTSIS G, LENS H. Data-driven dynamic models of active distribution networks using unsupervised learning techniques on field measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2952-2965.
- [73] GOLPIRA H, SEIFI H, HAGHIFAM M R. Dynamic

- equivalencing of an active distribution network for large-scale power system frequency stability studies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2245-2254.
- [74] AZMY A M, ERLICH I, SOWA P. Artificial neural network-based dynamic equivalents for distribution systems containing active sources[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(6): 681-688.
- [75] 李培强, 曾小军, 李欣然, 等. 基于神经网络的分布式电源统一等效建模及其在 PSASP 中的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1224-1230.
- LI Peiqiang, ZENG Xiaojun, LI Xiran, et al. Unified equivalent modeling of distributed generation using artificial neural network and its application in PSASP[J]. Power System Technology, 2016, 40(4):1224-1230.
- [76] 黄俊铭, 朱建全, 庄远灿. 基于动态 RBF 神经网络的广义电力负荷建模[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 591-597.
- HUANG Junming, ZHU Jianquan, ZHUANG Yuancan. Generalized power load modeling based on dynamic RBF neural network[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 591-597.
- [77] ZHENG Chao, WANG Shaorong, LIU Yilu, et al. A novel equivalent model of active distribution networks based on LSTM[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(9): 2611-2624.
- [78] ZHENG Chao, WANG Shaorong, LIU Yilu, et al. A novel RNN based load modelling method with measurement data in active distribution system[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 166: 112-124.
- [79] 王韵楚, 张思, 林振智, 等. 分布式源荷参与辅助服务的市场机制与实现方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 2-16.
- WANG Yunchu, ZHANG Si, LIN Zhenzhi, et al. Market mechanisms and implementation methods for distributed sources and loads participating in ancillary services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 2-16.
- [80] FARIVAR G G, MANALASTAS W, TAFTI H D, et al. Grid-connected energy storage systems: state-of-the-art and emerging technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(4): 397-420.
- [81] 中国能源研究会储能专委会. 储能产业研究白皮书 2023[R/OL]. (2023) [2024-06-10]. <https://cpnn.com.cn/news/baogao2023/202307/W020230725381488198635.pdf>.
- [82] 屈星, 李欣然, 盛义发, 等. 考虑电池储能系统的配电网广义综合负荷建模[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 490-501.
- QU Xing, LI Xinran, SHENG Yifa, et al. Generalized composite load mode of distribution network considering battery energy storage system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2):490-501.
- [83] CALERO F, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K. aggregated BESS dynamic models for active distribution network studies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2077-2088.
- [84] 陈颖, 宋炎侃, 黄少伟, 等. 基于 GPU 的大规模配电网电磁暂态并行仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 82-88.
- CHEN Ying, SONG Yankan, HUANG Shaowei, et al. GPU-based techniques of parallel electromagnetic transient simulation for large-scale distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 82-88.
- [85] MA Xin, YANG Conghuan, ZHANG Xiaoping, et al. Real-time simulation of power system electromagnetic transients on FPGA using adaptive mixed-precision calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3683-3693.
- [86] 陈颖, 高仕林, 宋炎侃, 等. 面向新型电力系统的高性能电磁暂态云仿真技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2854-2864.
- CHEN Ying, GAO Shilin, SONG Yankan, et al. High-performance electromagnetic transient simulation for new-type power system based on cloud computing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2854-2864.
- [87] 徐晋, 汪可友, 李国杰. 电力电子设备及含电力电子设备电力系统实时仿真研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 3-17.
- XU Jin, WANG Keyou, LI Guojie. Review of real-time simulation of power electronic devices and power systems integrated with power electronic devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 3-17.
- [88] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(一): 模型结构[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1378-1389.
- SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structure and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (part I): model structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1378-1389.
- [89] 周佩朋, 孙华东, 项祖涛, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(三): 电磁暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2990-3000.
- ZHOU Peipeng, SUN Huadong, XIANG Zutao, et al. Research on model structure and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system

- simulation (part III): electromagnetic transient model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2990-3000.
- [90] 夏越, 游智凯, 赵鹏, 等. 相域恒阻抗同步电机移频电磁暂态建模与仿真[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1663-1679. XIA Yue, YOU Zhikai, ZHAO Peng, et al. Modeling of synchronous machine in phase domain with constant inner impedance based on frequency shifting theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1663-1679.
- [91] MOSTAJERAN E, AMIRI N, JATSKEVICH J. Constant-parameter voltage-behind-reactance synchronous machine models considering main flux saturation for EMTP-type programs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(1): 400-411.
- [92] 陈武晖, 吴明哲, 张军, 等. 模块化多电平换流器电磁暂态模型研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4755-4765. CHEN Wuhui, WU Mingzhe, ZHANG Jun, et al. Review of electromagnetic transient modeling of modular multilevel converters[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4755-4765.
- [93] 康锦萍, 杨广亮, 杜三恩, 等. 系统电磁暂态仿真中大型感应电机不同暂态模型对比研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5697-5706. KANG Jinping, YANG Guangliang, DU Sanen, et al. Comparison of different transient models of large induction motors in electromagnetic transient simulation of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5697-5706.
- [94] THERRIEN F, WANG Liwei, CHAPARIHA M, et al. Constant-parameter interfacing of induction machine models considering main flux saturation in EMTP-type programs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 12-26.
- [95] MILANI M T, KHODABAKHCHIAN B, MAHSEREDJIAN J, et al. Development and validation of a new detailed EMT-type component-based load model [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 197: 107290.
- [96] MILANI M T, KHODABAKHCHIAN B, MAHSEREDJIAN J. Detailed EMT-type load modeling for power system dynamic and harmonic studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 703-711.
- [97] SUBEDI S, RAUNIYAR M, ISHAQ S, et al. Review of methods to accelerate electromagnetic transient simulation of power systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 89714-89731.
- [98] 姜宽, 王慧芳, 林达, 等. 面向逆变器型分布式电源的快速建模与仿真方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 13-19. JIANG Kuan, WANG Huifang, LIN Da, et al. Rapid modeling and simulation method for inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 13-19.
- [99] SHUAI Zhikang, PENG Yelun, GUERRERO J M, et al. Transient response analysis of inverter-based microgrids under unbalanced conditions using a dynamic phasor model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2868-2879.
- [100] ZANG Lindong, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A d-axis based current differential protection scheme for an active distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 23.
- [101] 郑涛, 邹芃莹, 王子鸣. 计及锁相环动态响应特性的光伏并网系统故障电流解析计算[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4656-4667. ZHENG Tao, ZOU Pengying, WANG Ziming. Fault current analysis of photovoltaic grid-connected system considering dynamic response characteristics of PLL[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4656-4667.
- [102] IEC. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - part: 0 calculation of currents: IEC 60909—2016[S]. Geneva: IEC, 2016.
- [103] DAS J C, MOHLA D C. Harmonizing with the IEC: ANS/IEEE standards for high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2013, 19(1): 16-26.
- [104] IEEE. IEEE recommended practice for conducting short-circuit studies and analysis of industrial and commercial power systems: IEEE Std 3002.3—2018[S]. New York: IEEE, 2018.
- [105] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 三相交流系统短路电流计算第1部分: 电流计算: GB/T 15544.1—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems-part 1: calculation of currents: GB/T 15544.1—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [106] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 559-2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Setting guide for 220 kV~750 kV power system protection equipment: DL/T 559—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [107] 叶圣永, 程超, 唐权, 等. 基于BPA的短路电流计算模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 138-143.

- YE Shengyong, CHENG Chao, TANG Quan, et al. Research on calculation mode of short-circuit current based on BPA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 138-143.
- [108] 曹伟, 王伟, 刘蓓, 等. 受端电网负荷动态特性与三相短路电流相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 61-65.
- CAO Wei, WANG Wei, LIU Bei, et al. Analysis on relativity between load dynamics and three-phase short circuit current of receiving end power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 61-65.
- [109] 刘楠, 唐晓骏, 马世英, 等. 负荷模型对电力系统短路电流计算的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 144-149.
- LIU Nan, TANG Xiaojun, MA Shiyong, et al. Influences of load models on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 144-149.
- [110] 刘楠, 张彦涛, 秦晓辉, 等. 感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 187-192.
- LIU Nan, ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, et al. Impact of load induction motor on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 187-192.
- [111] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.
- YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [112] 杨杉, 同向前, 刘健, 等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1977-1982.
- YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [113] SHUAI Zhikang, SHEN Chao, YIN Xin, et al. Fault analysis of inverter-interfaced distributed generators with different control schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1223-1235.
- [114] 杨杉, 喻希, 罗朝旭, 等. 含换流器型分布式电源配电网的不对称短路电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 44-53.
- YANG Shan, YU Xi, LUO Zhaoxu, et al. Asymmetric short-circuit current calculation of a distribution network with inverter-based distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 44-53.
- [115] 孙媛媛, 许庆桑, 马钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 154-169.
- SUN Yuanyuan, XU Qingshen, MA Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.
- [116] HU Zhe, HAN Yang, ZALHAF A S, et al. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 218: 109234.
- [117] CIGRE Working Group. Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimating of existing values in the network[J]. Electra, 1977: 35-54.
- [118] 吴笃贵, 徐政. 电力负荷的谐波建模[J]. 电网技术, 2004(3): 20-24.
- WU Dugui, XU Zheng. Harmonic modeling of electric loads[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 20-24.
- [119] 林才华, 张逸, 邵振国, 等. 用于低频非平稳谐波研究的超高功率电弧炉模型[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 1-8.
- LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo. An ultra-high-power electric arc furnace model for low-frequency non-stationary inter-harmonics studies[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 1-8.
- [120] 张逸, 林才华, 邵振国, 等. 基于电子连续性方程的新型交流电弧炉通用模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7425-7434.
- ZHANG Yi, LIN Caihua, SHAO Zhenguo, et al. A novel general model of AC electric arc furnace based on electron continuity equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7425-7434.
- [121] HIYAMA T, HAMMAM M S A A, ORTMEYER T H. Distribution system modeling with distributed harmonic sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1297-1304.
- [122] FAURI M. Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1632-1638.
- [123] 雍静, 陈亮, 陈双燕. 台式计算机负荷的频域谐波模型及衰减特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 122-129.
- YONG Jing, CHEN Liang, CHEN Shuangyan. Frequency-domain harmonic model and attenuation characteristics of desktop PC loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 122-129.
- [124] 雍静, 肖兵. 典型单相非线性负荷的精确谐波模型及其谐波衰减特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3210-3219.

- YONG Jing, XIAO Bing. Harmonic modeling and investigation on harmonic attenuation effect for typical single-phase nonlinear loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3210-3219.
- [125] 周念成, 魏能峤, 王佳佳, 等. 三相不控整流负荷的谐波功率实测建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5583-5593, 5835.
- ZHOU Niancheng, WEI Nengqiao, WANG Jiajia, et al. Measurement-based harmonic power modeling of three-phase uncontrolled rectification load[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5583-5593, 5835.
- [126] GAO Bo, WANG Yang, XU W. Modeling voltage source converters for harmonic power flow studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3426-3437.
- [127] 夏焰坤, 唐文张, 林欣懿. 基于 LS-SVM 的谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2): 94-99.
- XIA Yankun, TANG Wenzhang, LIN Xinyi. Harmonic impedance estimation method based on least squares support vector machine[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(2): 94-99.
- [128] XIE Xiangmin, CHEN Daolian. Data-driven dynamic harmonic model for modern household appliances[J]. Applied Energy, 2022, 312: 118759.
- [129] KLIMAS M, GRABOWSKI D. Application of shallow neural networks in electric arc furnace modeling[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6814-6823.
- [130] 夏焰坤, 朱赵晴, 唐文张, 等. 基于改进秃鹰算法优化极限学习机的谐波发射水平估计[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 156-165.
- XIA Yankun, ZHU Zhaoqing, TANG Wenzhang, et al. Harmonic emission level estimation method based on an improved bald eagle search optimized extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 156-165.
- [131] 张逸, 刘必杰, 邵振国, 等. 基于高斯过程回归的谐波源不确定性通用模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 992-1002.
- ZHANG Yi, LIU Bijie, SHAO Zhenguo, et al. General and uncertain harmonic source model based on gaussian process regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 992-1002.
- [132] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
- XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.
- [133] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [134] IEEE. IEEE guide for test procedures for synchronous machines including acceptance and performance testing and parameter determination for dynamic analysis: IEEE Std 115—2019[S]. New York, IEEE, 2020.

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-07-11

作者简介:

陶劲宇(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷建模; E-mail: hhu_tjy@hhu.edu.cn

秦川(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统频率分析与控制等; E-mail: cqin@hhu.edu.cn

金宇清(1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统建模、分析与控制等。E-mail: jyq16@hhu.edu.cn

(编辑 张颖)